

УДК 621.941

DOI: 10.30987/article\_5d10851f4b6017.67446520

Е.В. Пашков, А.А. Вожжов

## АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ СЛУЧАЕВ ОДНОРЕЗЦОВОЙ ОБРАБОТКИ И С ОППОЗИТНЫМ РАЗМЕЩЕНИЕМ РЕЗЦОВ

Приведен анализ колебаний для случаев одностороннего и двухрезцового фасонного точения с противоположным размещением резцов. Рассмотрена неустойчивая форма колебаний системы «резец - заготовка» в процессе точения. Представлены зависимости, позволяющие оценить величины колебаний при обработке. Приведено решение предло-

женной задачи для конкретного случая, подтверждающего теоретические предположения.

**Ключевые слова:** двухрезцовое точение, односторонняя обработка, коллектор, фасонная поверхность, противоположное размещение резцов, колебания, качество поверхности, точность.

E.V. Pashkov, A.A. Vozhzhov

## ANALYSIS OF TOOL OSCILLATION FOR CASES OF SINGLE-CUTTER PROCESSING AND WITH CUTTERS OPPOSITE LOCATION

The analysis of oscillation for cases of single-cutter and twin-cutter shaped turning with the cutters opposite location is shown. An unstable form of "cutter-blank" system oscillation during turning is considered. The dependences allowing the assessment of an oscillation value during processing are presented. The

solution of the problem offered for a specific case confirming theoretical suppositions is shown.

**Key words:** twin-cutter turning, single-cutter processing, collector, shaped surface, cutters opposite location, oscillation, surface quality, accuracy.

Работа посвящена совершенствованию методов обработки профильных щеточных канавок токосъемных колец коллекторов малого диаметра высокоточных электрических микромашин с использованием двухрезцового фасонного точения и конструктивных решений технологических элементов подсистемы «инструмент - деталь», которые позволяют обеспечить точность и качество поверхности на операции чистового фасонного точения.

Рассматриваемые типы коллекторов имеют малые габаритные размеры и сложную конструкцию. На рис. 1а пока-

зана схема осевого сечения коллектора. Коллектор состоит из контактных колец 1, которые опрессованы и залиты компаундом (изолятором) 3, предотвращающим электрический контакт между кольцами. Под каждое кольцо 1 в месте пайки 5 подпаян медный токопровод 4. Основанием конструкции служит центральный валик 2. Сборка и последующая обработка узлов коллектора характеризуется повышенной сложностью и занимает много времени, следовательно, производительность их изготовления очень низкая.

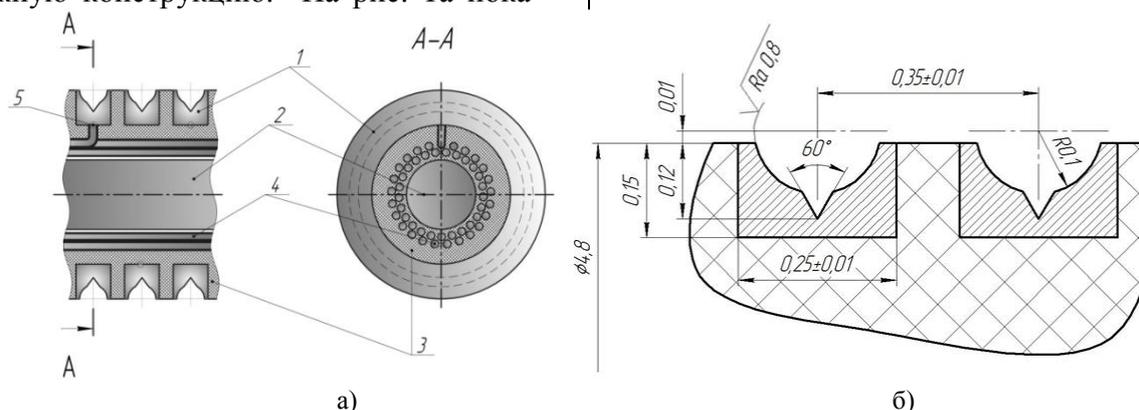


Рис.1. Схема конструкции коллекторов ГК-11, ГК-12 (а) и профиль поперечного сечения щеточной канавки (б): 1- контактное кольцо; 2- центральный валик; 3- компаунд (электроизоляция); 4- контактные провода; 5- пайка провода под кольцо

При чистовой обработке фасонных поверхностей щеточных канавок, функционально являющихся исполнительными (рабочими) поверхностями, необходимо обеспечивать не только точность размера и формы, но также точность взаимного расположения их осей по отношению к наружным базовым поверхностям и качество обработки.

Известно, что точность обработки и шероховатость поверхности, а следовательно, и износ резцов в значительной степени зависят от виброустойчивости технологической системы [1; 2]. Увеличе-

ние виброустойчивости технологической системы способствует повышению производительности обработки, так как в этом случае можно повысить и режимы резания, не опасаясь возникновения вибраций.

При традиционном одностороннем фасонном точении (рис. 2а) действие радиальной составляющей силы резания  $P_y$  не компенсируется, виброустойчивость технологической системы не повышается и повышение точности и качества обработки достигается с помощью малоэффективных способов, не позволяющих добиться повышения производительности.

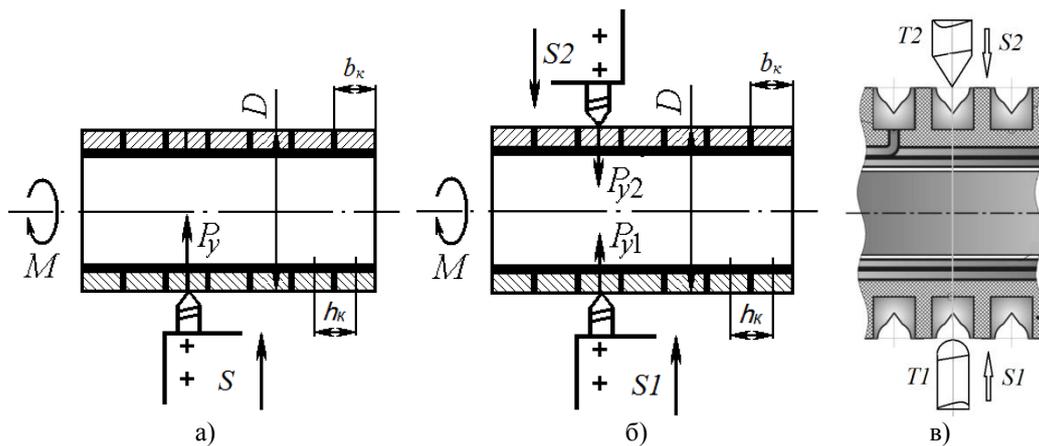


Рис. 2. Рассматриваемые технологические схемы фасонного точения:  
а - односторонняя обработка резцом сложной формы; б - двухрезцовая совмещенная обработка чистовыми резцами различного профиля, расположенными оппозитно

Применение двухрезцового чистового фасонного точения с разделением удаляемого объема материала кольца для образования щеточной канавки на два объема (рис. 2в), распределенных между двумя резцами (с обеспечением при этом равенства радиальных составляющих сил резания  $P_{y1}$  и  $P_{y2}$  (рис. 2б)), устраняет прогибы коллектора, а следовательно, повышает виброустойчивость технологической системы.

В процессе фасонного чистового точения неустойчивая форма колебаний чаще всего представляет собой колебания системы «резец - заготовка». Для описания подобных колебаний системы достаточно ограничиться одной степенью свободы в направлении действия вектора равнодействующей силы  $\bar{P}_{zy} = \bar{P}_z + \bar{P}_y$ , где  $P_z$  - тангенциальная, а  $P_y$  - радиальная составляю-

щая силы резания [3; 4]. В работе принята расчетная схема с одной сосредоточенной приведенной массой, т.е. с одной степенью свободы.

При колебаниях на рассматриваемую систему действуют следующие силы: сила инерции; восстанавливающая сила, равная силе упругости; сила вязкого сопротивления; внешняя сила  $P(\tau)$ , которая является функцией времени  $\tau$  [5].

Дифференциальное уравнение движения системы [5]:

$$M \frac{d^2 y}{d\tau^2} + H \frac{dy}{d\tau} + Cy = P(\tau),$$

где  $M$  - приведенная масса системы;  $H$  - вязкое сопротивление;  $C$  - жесткость системы.

Решение уравнения, определяющего динамическое смещение резца при

начальных условиях  $y(0) = 0$  и  $y'(0) = 0$ , имеет вид

$$y = \frac{1}{Mf} \int_0^{\tau} P(u) e^{\lambda(\tau-u)} \sin f(\tau-u) du,$$

где  $f = \sqrt{\frac{C}{M} - \frac{H^2}{4M^2}}$  - собственная частота

колебаний системы;  $\lambda = -\frac{H}{2M}$  - декремент затухания колебаний;  $u$  - время, которое изменяется в пределах от  $u = 0$  до  $u = \tau$ .

Сила  $P_1(\tau)$  для одного реза изменяется во времени  $\tau$  по следующему закону:

$$P_1(\tau) = Kt_{\min} + K \frac{\Delta t}{2} (1 + \sin \omega t),$$

$$y_1 = \frac{1}{Mf} \int_0^{\tau} \left( Kt_{\min} + K \frac{\Delta t}{2} (1 + \sin \omega u) \right) e^{\lambda(\tau-u)} \sin f(\tau-u) du.$$

В случае двухрезцовой обработки внешняя сила для первого реза будет изменяться во времени так же, как и в случае однорезцовой [6; 7]:

$$P_1(\tau) = Kt_{\min} + K \frac{\Delta t}{2} (1 + \sin(\omega\tau)).$$

Для второго реза, расположенного оппозиционно, т.е. под углом  $180^\circ$  по отношению к первому, внешняя сила

$$P_2(\tau) = Kt_{\min} + K \frac{\Delta t}{2} (1 + \sin(\omega\tau + 180^\circ)),$$

или

$$y_{1-2} = \frac{1}{Mf} \int_0^{\tau} K \Delta t \sin(\omega u) e^{\lambda(\tau-u)} \sin f(\tau-u) du.$$

Применение двухрезцового точения не только снижает (примерно в 2 раза) амплитуды колебаний, но и возвращает обрабатываемую деталь в исходное положение квазистатического равновесия. Графики колебаний при однорезцовом и двухрезцовом точении изображены на рис. 3.

Как следует из анализа приведенных выше формул для  $y_1$  и  $y_{1-2}$ , в случае двухрезцовой обработки амплитуды колебаний инструмента определяются не пол-

где  $\omega$  - частота вращения шпинделя;  $K$  - коэффициент пропорциональности между силой резания и глубиной резания;  $t_{\min}$  - минимальный объем срезаемого материала;  $\Delta t$  - изменение величины среза,  $\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$ .

Такой закон изменения внешней силы характерен в практике для случая смещения оси предварительно обработанной заготовки в процессе последующей чистовой обработки. В этом случае величина динамического смещения инструмента в любой момент обработки определяется согласно выражению [5]

$$P_2(\tau) = Kt_{\min} + K \frac{\Delta t}{2} (1 - \sin(\omega\tau)).$$

Так как векторы сил от обоих резцов направлены противоположно друг другу, то суммарная внешняя сила, действующая на систему «резец - заготовка», определяется разностью сил  $P_1(\tau)$  и  $P_2(\tau)$ , т.е.

$$P_{1-2}(\tau) = P_1(\tau) - P_2(\tau),$$

или

$$P_{1-2}(\tau) = K \Delta t \sin(\omega\tau).$$

Тогда для двухрезцового точения

ным припуском на обработку, как при однорезцовом точении, а лишь величиной смещения  $\Delta t$ , что подтверждает уменьшение амплитуды колебаний.

В результате обработки канавки двумя резцами одновременно можно свети к минимуму негативное влияние деформаций. Это способствует повышению точности и уменьшению высоты микронеровностей обработанной поверхности [8; 9].

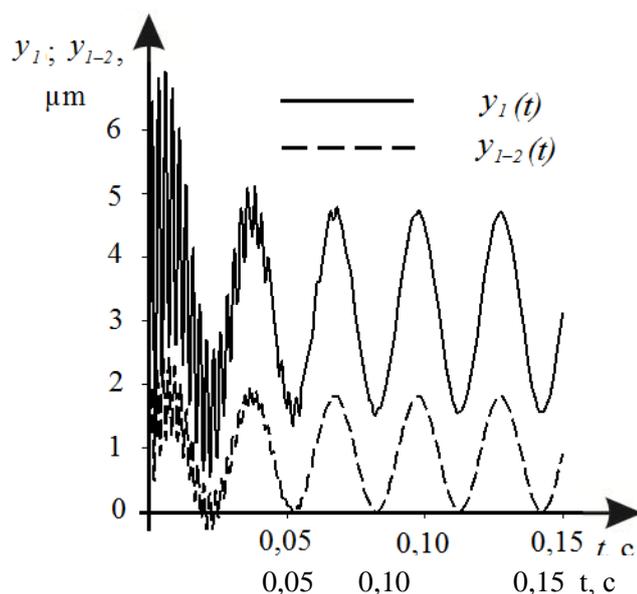


Рис. 3. Амплитуды колебаний при одностороннем ( $y_1(t)$ ) и двухстороннем ( $y_{1-2}(t)$ ) точении

Использование технологической схемы двухрезцового чистового фасонного точения может обеспечить существенное уменьшение высоты микронеровностей по сравнению с односторонним. Возможно

повышение показателей точности формы продольного и поперечного сечений каналов, что подтверждает эффективность применения метода в условиях фасонного точения [10].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гулин, А.В. Введение в численные методы в задачах и упражнениях / А.В. Гулин, О.С. Мажорова, В.А. Морозова. - М.: Инфра-М, 2017. - 368 с.
2. Мазур, М.П. Основы обработки материалов / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залого, Ю.К. Новосолов, Ф.Я. Якубов; под заг. ред. М.П. Мазура. - Львов: Новий Світ-2000, 2010. - 422 с.
3. Соломенцев, Ю.М. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, С.П. Протопопов [и др.]. - М.: Машиностроение, 1980. - 536 с.
4. Вожжов, А.А. Моделирование процесса двухрезцового точения фасонных поверхностей / А.А. Вожжов, Е.В. Пашков // Научно-технические достижения в машиностроении. - 2017. - №6(72). - С.25-30.
5. Колев, К.С. Точность обработки и режимы резания / К.С. Колев, Л.М. Горчаков. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1976. - 144 с.
6. Петраков, Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів врізанням / Ю.В. Петраков. - Київ: УкрНДІАТ, 2004. - 383 с.
7. Петрушин, С.И. Основы формообразования резанием лезвийными инструментами / С.И. Петрушин. - Томск: Изд-во ТГУ, 2003. - 172 с.
8. Стуканов, В.А. Материаловедение / В.А. Стуканов. - М.: Форум, Инфра-М, 2015. - 368 с.
9. Бурцев, В.М. Технология машиностроения. В 2 т. Т. 2. Производство машин / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, О.М. Деев [и др.]; под ред. Г.Н. Мельникова. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. - 640 с.
10. Vozhzhov, A. Twin-cutter form turning of commutator rings using cutters' progressive motion piezoelectric engines / A. Vozhzhov, E. Pashkov, V. Golovin, P. Florya // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017). - MATEC Web of Conferences 129, 01071 (2017).

4. Vozhzhov, A.A. Modeling of shaped surface twin-cutter turning process / A.A. Vozhzhov, E.V. Pashkov // Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. – 2017. – No.6 (72). – pp. 25-30.
5. Kolev, K.S. Processing Accuracy and Cutting Modes / K.S. Kolev, L.M. Gorchakov. – 2-nd Ed. revised and expanded. – M.: Mechanical Engineering, 1976. – pp. 144.
6. Petrakov, Yu.V. Automatic Control of Material Cutting Processes / Yu.V. Petrakov. – Kiev: UkrN-SIAT, 2004. – pp. 383.
7. Petrushin, S.I. Shaping Fundamentals by Blade Cutting Tools / S.I. petrushin. – Tomsk: Publishing House of TSU, 2003. – pp. 172.
8. Stukanov, V.A. Material Science / V.A. Stukanov. – M.: Forum, Infra-M, 2015. – pp. 368.
9. Burtsev, V.M. Engineering Technique. In 2 Vol., Vol.2 Machine Production / V.M. Burtsev, A.S. Vasilive, O.M. Deev [et al.]; under the editorship of G.N. Melnikov. – 2-d Ed., revised and expanded. – M.: Publishing House of Bauman STU, 2001. – pp. 640.
10. Vozhzhov, A. Twin-cutter form turning of commutator rings using cutters' progressive motion piezo-electric engines / A. Vozhzhov, E. Pashkov, V. Golovin, P. Florya // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017). - MATEC Web of Conferences 129, 01071 (2017).

*Статья поступила в редакцию 28.04.19*

*Рецензент: д.т.н., профессор Севастопольского государственного университета*

*Покинтелица Н.И.*

*Статья принята к публикации 27. 05. 19.*

#### **Сведения об авторах:**

**Пашков Евгений Валентинович**, д.т.н., профессор кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» Севастопольского государственного университета, e-mail: [pashkov@sevsu.ru](mailto:pashkov@sevsu.ru).

**Pashkov Evgeny Valentinovich**, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. "Instrument Systems and Engineering Process Automation", Sevastopol State University, e-mail: [pashkov@sevsu.ru](mailto:pashkov@sevsu.ru).

**Вожжов Андрей Анатольевич**, к.т.н., ст. преподаватель кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» Севастопольского государственного университета, e-mail: [0506773532@mail.ru](mailto:0506773532@mail.ru).

**Vozhzhov Andrey Anatolievich**, Can. Sc. Tech., Senior lecturer of the Dep. "Instrument Systems and Engineering Process Automation", Sevastopol State University, e-mail: [0506773532@mail.ru](mailto:0506773532@mail.ru).